

DISCURSO DEL PROFESOR AMABLE LIÑÁN MARTÍNEZ

“La ingeniería aeronáutica cumple sus primeros cien años”

Antes que nada, es para mí un placer mostrar mi agradecimiento a la Universidad Politécnica de Cataluña y, especialmente, a esta escuela de ingeniería industrial, por el nombramiento de doctor *honoris causa*. Mi agradecimiento muy especial a Luis Virto, admirado colega y amigo desde hace muchos años por las palabras tan cariñosas, un tanto exageradas, que me dedica en la *laudatio*. Para los encargados de la enseñanza de la mecánica de fluidos, ha sido siempre admirable la preocupación que Luis Virto ha mostrado en sus investigaciones por atender a las necesidades de la industria sin dejar de lado los aspectos fundamentales. Para poner algún ejemplo, puedo trasladarles aquí mi admiración por sus trabajos sobre los flujos y transferencia de calor en medios porosos o fibrosos, y por sus investigaciones sobre los procesos de secado. Animo a los profesores y estudiantes de esta universidad a seguir su ejemplo, conectando su enseñanza y trabajo de investigación a las necesidades presentes y futuras de la industria.

Es para mí un honor y un privilegio tener la oportunidad que el nombramiento me ofrece de participar en los actos de celebración de la iniciación, hace cien años, de la enseñanza de la ingeniería industrial en esta escuela. Esta celebración coincide con la iniciación aquí de la enseñanza de la ingeniería aeronáutica. Por esta iniciación les doy mi más cordial enhorabuena, estoy seguro de que con estas nuevas enseñanzas la Universidad Politécnica de Cataluña contribuirá decisivamente al desarrollo de la ingeniería aeronáutica española.

Pienso que el nombramiento con que me honran atiende, más que a mis propios méritos, a las circunstancias que han facilitado mi actividad docente e investigadora en la primera, y hasta hace poco única, escuela de ingeniería aeronáutica española, donde el devenir del tiempo me ha convertido en el decano de sus profesores.

La escuela donde recibí mi título de ingeniero acaba de cumplir tres cuartos de siglo, al igual que el Guggenheim Aeronautical Laboratory del Instituto Tecnológico de California (CALTECH), donde complete mi formación y también

recibí el título de Ingeniero Aeronáutico. También la ingeniería aeronáutica acaba de celebrar los cien años de su nacimiento como niña robusta. Este nacimiento se hace coincidir, por consenso indiscutible, con los primeros vuelos de los hermanos Wilbur y Orville Wright, el 17 de diciembre de 1903, en Kitty Hawk, Carolina del Norte.

La ingeniería aeronáutica, ampliada posteriormente a la aeroespacial, ha tenido durante el siglo XX un desarrollo espectacular, y estoy seguro de que lo seguirá teniendo en el futuro. Nació respondiendo a motivaciones deportivas, pero pronto su desarrollo fue en gran medida incentivado por las aplicaciones militares de la aviación, que cambiaron drásticamente el carácter de las guerras. Las aplicaciones comerciales ligadas al transporte aéreo, iniciadas con fuerza en el segundo tercio del siglo pasado, se han convertido ahora en el motor principal del desarrollo aeronáutico. El transporte aéreo ha propiciado la conversión de nuestra Tierra en la aldea global actual, no de un modo virtual sino real. El tráfico aéreo se duplica cada diez o quince años.

El desarrollo de la ingeniería aeronáutica no podía haber ocurrido sin un desarrollo paralelo de las ciencias aeronáuticas. Es verdaderamente notable que la ingeniería aeronáutica y la mecánica de fluidos moderna (una de las disciplinas centrales de las ciencias aeronáuticas) nacieran simultáneamente a comienzos del siglo XX, la ingeniería aeronáutica de la mano de los hermanos Wright y la mecánica de fluidos moderna de la mano de Ludwig Prandtl.

Deseo dedicar mi discurso a celebrar las aportaciones, sin duda memorables, de los hermanos Wright a la ingeniería aeronáutica y también las de Ludwig Prandtl, que murió hace cincuenta años después de habernos enriquecido en los cincuenta anteriores con contribuciones esenciales a la mecánica de fluidos. Decía Leibnitz que "es de suma utilidad reconocer los orígenes de los descubrimientos memorables, especialmente los que no han sido encontrados fortuitamente, sino como resultado de la meditación. El arte de hacer descubrimientos puede transmitirse cuando se examinan ejemplos notables de este arte".

Antes de hablarles de las contribuciones de Wilbur y Orville Wright, empezaré con un resumen breve de los primeros vuelos en aerostatos y de los intentos de vuelo en aeronaves más pesadas que el aire.

El sueño de volar ha acompañado al ser humano desde tiempo inmemorial, por lo que es sorprendente que tardase tanto en llegar a desplazarse por el aire. De los dos modos posibles de sustentación en el aire, el más simple es el que utilizan los aerostatos o los dirigibles. Estos están dotados con una bolsa, en forma de globo o huso, inflada con aire.

caliente o hidrogeno, para generar, como los barcos, la sustentacion necesaria con la ayuda del principio de Arquimedes. Los vuelos en globos inflados con aire caliente arrancan de las primeras ascensiones que hicieron en 1783 los hermanos Montgolfier. En el mismo año, Charles y los hermanos Robert iniciaron los vuelos con globos llenos de hidrogeno. Charles es el fisico que propuso en 1787 la ley de la termodinamica que lleva su nombre.

Parece casi seguro que fue el ingeniero Agustin de Betancourt el primero en España en lanzar un globo aerostatico, en noviembre de 1783. El conde de Aranda promovio durante el reinado de Carlos IV el desarrollo de las aplicaciones militares de la aerostacion, que se iniciaron con exito, bajo la direccion de Proust, con la construccion de un globo que resulto ser un observatorio excelente. La aerostacion militar española renace en 1884, cuando se crea, al mando del comandante Pedro Vives, el Servicio Aerostatico, que incluia el Parque Aerostatico de Guadalajara y la Compañia de Aerostacion. A este servicio se incorporarian posteriormente los ingenieros militares Alfredo Kindelan y Emilio Herrera, quienes tuvieron un papel determinante en el desarrollo de la aeronautica española. En particular, Emilio Herrera fue el primer director de la Escuela Superior Aerotecnica, creada hace ahora setenta y seis años.

El primer paso hacia el dirigible se dio en 1852, cuando el ingeniero frances Henri Giffard sustituyo el globo por una especie de huso para facilitar el control y la direccion de su movimiento. En 1874, el general frances Meusnier instalo un motor de vapor en la barquilla para mover una helice y así proporcionar la propulsion. Al exito posterior de los dirigibles contribuyeron especialmente el brasileño Santos-Dumont, con muchos vuelos en sus dirigibles, y el conde Zeppelin, que introdujo el dirigible rigido.

La aportacion española al desarrollo de los dirigibles se inicia con la presentacion en la Academia de Ciencias, por el ingeniero de caminos Leonardo Torres Quevedo, de un proyecto de dirigible semirrigido con armadura funicular, que era facilmente desmontable para facilitar su transporte. Para su desarrollo, en 1904, el Gobierno aprobo la creacion de un centro de ensayos de aerostacion para el estudio teorico y experimental de la navegacion aerea, que puso bajo la direccion de Torres Quevedo. La experimentacion fue llevada a cabo en el Parque Aerostatico de Guadalajara, donde Torres Quevedo conto con la colaboracion de Alfredo Kindelan. Las primeras pruebas del dirigible se hicieron en 1908 y su fabricacion se inicio en Francia en 1909, por la casa ASTRA.

El desarrollo del vuelo con aeronaves mas pesadas que el aire es mas tardio. George Cayley fue el pionero, con sus investigaciones en la primera mitad del siglo XIX, en establecer los conceptos que ayudan a definir los problemas que

es preciso resolver para conseguir el vuelo. Él señaló que la aeronave debe disponer de un sistema de sustentación para equilibrar el peso, formado por las alas, que proporcionan la fuerza sustentadora debida a las presiones ejercidas por el aire cuando se mueve respecto al cuerpo. Para equilibrar la resistencia al movimiento, hay que dotar la aeronave de un sistema de propulsión o, en su defecto, se ha de inclinar la trayectoria hacia el suelo con un ángulo de planeo, para así compensar la resistencia con la componente del peso según la trayectoria. Además, hay que dotar la aeronave de sistemas de estabilidad y control. Con todo ello, la aeronave necesita alas, fuselaje y una cola, a los que se incorporan timones, alerones y flaps. George Cayley construyó el primer modelo de planeador en 1804 y, posteriormente, dos planeadores que hicieron vuelos breves con piloto a bordo. Utilizó la técnica del brazo giratorio para medir la fuerza aerodinámica sobre una placa plana cuadrada a distintos ángulos de ataque.

Las aportaciones de George Cayley contribuyeron sin duda a incentivar los intentos de desarrollar el vuelo. Así, en 1866, se creó en Inglaterra la Aeronautical Society, hoy la Royal Aeronautical Society. Francis Wenham, uno de sus fundadores, construyó, junto con John Browning, el primer túnel aerodinámico. Tenía una sección cuadrada de 46 cm de lado, con la corriente proporcionada por un ventilador movido por un motor de vapor. Observaron que los valores más altos de la relación L/D entre la sustentación y la resistencia de placas correspondían a valores pequeños del ángulo de ataque. Diez años más tarde, Horatio Phillips construyó, también por encargo de la Aeronautical Society, un segundo túnel en el que la corriente resultaba de la aspiración del aire, aguas abajo de la sección de ensayo, mediante un eyector.

Sin embargo, una muestra de las dudas de los científicos respecto a las posibilidades del vuelo, consecuencia en parte del conocimiento todavía muy deficiente de la aerodinámica aplicada, está en las palabras que escribió Lord Kelvin cuando declinó la invitación a formar parte de la Aeronautical Society: “Yo no tengo ni un ápice de fe en ninguna otra forma de navegación aérea que no sea mediante globos, ni ninguna esperanza en los buenos resultados de los intentos de los que oímos hablar”.

En la mayor parte de los intentos de vuelo se trataba de emular con alas batientes el vuelo de los pájaros. Los intentos más exitosos fueron los del ingeniero alemán Otto Lilienthal, que diseñó y construyó hasta dieciséis tipos distintos de planeadores. Para la sustentación, utilizaba alas con perfiles en forma de arco de círculo, que había ensayado mediante el sistema del brazo giratorio. La resistencia se compensaba con la componente del peso correspondiente a la trayectoria descendente de la aeronave. Él mismo realizaba los vuelos, colgándose del armazón y moviendo su

cuerpo para conseguir la estabilidad y el control. El planeador era lo que hoy se conoce como planeador de suspensión o *hang-glider*, o también con el nombre equívoco de *ala delta*. En 1896 se mató por entrada en pérdida su planeador, después de haber hecho más de dos mil vuelos en los cinco años anteriores, en los que acumuló un total de cinco horas de vuelo. Escribió muchos artículos, así como un libro, aparecido en 1894, con el título 'El vuelo de los pajaros como fundamento del arte de volar', donde difundía los resultados de sus medidas y experiencias.

Octave Chanute, un ingeniero americano nacido en Francia, que fue presidente de la Asociación Americana de Ingenieros Civiles, diseñó un planeador biplano con una estructura tipo Pratt, que después adoptaron los hermanos Wright. En los vuelos iniciados en 1896, su colaborador Augustus Herring actuó como piloto, colgándose como Lilienthal del plano inferior. Octave Chanute contribuyó a la atracción por el vuelo con artículos y conferencias, y con un libro, publicado en 1896, con el título *Progress in Flight Machines*, donde se recogía toda la información disponible sobre el tema. Contribuyó como pocos a la difusión de los conocimientos sobre el vuelo y, en particular, a la educación de los hermanos Wright.

Otro grupo de entusiastas del vuelo se ocupó del problema de la propulsión. Entre ellos, el francés Alphonse Pénaud, paralítico desde su niñez, que diseñó y construyó aeromodelos dotados de estabilizador de cola para la guiñada y el cabeceo. Para la estabilidad de balanceo, las alas tenían un diedro positivo, que no utilizarían los hermanos Wright porque dificultaba el control de balanceo. La propulsión se conseguía con hélices movidas con cintas de caucho retorcidas. Un modelo de helicóptero, diseñado por Pénaud, fue regalado por el padre de los hermanos Wright, obispo protestante, a sus hijos cuando éstos tenían siete y once años. Sin duda, esto sirvió para incentivar su afición al vuelo. Aprendieron pronto a repararlo y a construir otros nuevos, aunque descubrieron, para su sorpresa, que no les era posible aumentar su tamaño manteniendo su capacidad de vuelo.

Samuel P. Langley, famoso astrónomo americano, secretario de la Smithsonian Institution, también dedicó un esfuerzo considerable al desarrollo del vuelo propulsado. Empezó haciendo experimentos con un brazo giratorio de 9 m de radio, y contribuyó con sus datos a la determinación de las fuerzas aerodinámicas sobre los perfiles que utilizó en sus planeadores. En 1896, consiguió hacer volar 1 200 m un aeromodelo que era propulsado por una hélice movida con un motor de vapor, lo que le animó a intentar dar el salto al vuelo propulsado con un piloto a bordo. Para este proyecto, recibió el apoyo del Departamento de Guerra americano con un contrato de 50 000 dólares, a los que añadió otros 25 000 aportados por la Smithsonian Institution.

Langley puso más énfasis en el motor que en el control o la estructura. Contrató a Charles Manly, un recién graduado en ingeniería en Cornell, que le ayudó con el desarrollo de un excelente motor de 52 CV para la propulsión. Manly hizo dos intentos de vuelo, en octubre y diciembre de 1903, desde una plataforma sobre el río Potomac. Ambos intentos resultaron fallidos, por lo que se canceló el proyecto.

El 17 de diciembre de 2003 se cumplieron cien años de los primeros vuelos de los hermanos Wright en una aeronave más pesada que el aire, era propulsada por una hélice, que ellos habían diseñado, movida por un motor alternativo de combustión interna, que ellos también habían diseñado y construido. La aeronave estaba provista de un sistema de estabilidad y control que ellos habían concebido.

Habían iniciado su empeño aeronáutico con el modesto objetivo de poder contribuir al desarrollo de planeadores para el vuelo deportivo, dotándolos del sistema de control adecuado. El esfuerzo, que culminó con los primeros vuelos propulsados en 1903 y los vuelos posteriores ya maduros en 1904 y 1905, fue hecho en solitario y sin financiación por los dos hermanos que, además de bien compenetrados, estaban dotados de una gran tenacidad y una asombrosa capacidad creativa e intelectual. Con su buen hacer, sentaron también las bases del procedimiento que se debía seguir para los desarrollos aeronáuticos posteriores. Es por ello por lo que celebramos ahora el centenario de la aviación.

Los cuatro vuelos que hicieron Wilbur y Orville Wright el 17 de diciembre de 1903 en Kitty Hawk, Carolina del Norte, señalan para nosotros el nacimiento de la ingeniería aeronáutica, porque sólo fue posible como resultado de sus observaciones, estudios, ensayos y el trabajo intenso y meditado que hicieron durante los cuatro años anteriores (en realidad, en el poco tiempo libre que, en el otoño, les permitía su trabajo en el taller de alquiler, venta, reparación y fabricación de bicicletas de su propio diseño, que, en 1893, habían montado en Dayton, Ohio). Consideramos a los hermanos Wright los primeros ingenieros aeronáuticos, puesto que nos enseñaron cómo había que proceder para dotar el avión de una configuración y una estructura bien integradas con los sistemas de sustentación, propulsión y control y guiado.

Los hermanos Wright estaban dotados de una curiosidad intelectual excepcional. Aunque su educación formal terminó con la enseñanza secundaria, eran lectores asiduos de la Enciclopedia Británica, que tenían en su casa. El menor poseía un gran ingenio y habilidad mecánica; había trabajado dos años, durante las vacaciones veraniegas de la enseñanza secundaria, en una imprenta. Entonces concibió un nuevo tipo de prensa, muy novedoso, que construye-

ron los hermanos como base para una imprenta que montaron, y fue su fuente principal de ingresos en el período 1890-1896

Fue durante ese período cuando se sumaron -quizás fueron los primeros en Dayton- a la fiebre deportiva que había llegado con la bicicleta. Por la habilidad mecánica de ambos, pronto se encontraron reparando las bicicletas de muchos de sus amigos, esto les animó a abrir un taller de bicicletas en 1893. Para disponer de la potencia necesaria para mover el torno y otras herramientas, Orville diseñó y construyó un motor de gas de 2 CV, que posteriormente utilizaría para mover el ventilador de su túnel aerodinámico.

Los hermanos Wright estaban muy impresionados por los vuelos de planeo del ingeniero mecánico alemán Otto Lilienthal. Su muerte en 1896 los motivó a participar en el empeño de volar con planeadores. Su experiencia con la bicicleta, que es un vehículo inestable, los llevó a centrar su atención en el control y el guiado. Pensaron que podían hacer una contribución esencial al vuelo dotando al planeador de superficies móviles para conseguir el control basándose en las fuerzas aerodinámicas, así pues, abandonaron los empeños anteriores de buscar el control con el desplazamiento del cuerpo del piloto, como en la cuerda floja.

Wilbur tenía treinta y dos años cuando, en mayo de 1900, decidió escribir a Octave Chanute para pedirle consejos acerca de la viabilidad de su plan de acción. La carta empezaba diciendo:

“Durante los últimos años he estado afligido por la creencia de que el hombre puede volar. Mi enfermedad ha aumentado en severidad y siento que pronto me costará una cantidad creciente de dinero e incluso la vida. He estado tratando de organizar mis negocios de tal modo que pueda dedicar todo mi tiempo durante unos meses a la experimentación en este campo.”

Chanute los animó y les dio consejos respecto al tipo de madera y su tratamiento, a los barnices y al lugar de ensayos. Octave Chanute se convirtió pronto en un entusiasta defensor de los proyectos de los hermanos Wright, y en un excelente embajador para la difusión de sus ideas y resultados.

Eligieron una configuración estructural del avión con dos planos sustentadores limitados por dos largueros en los bordes de ataque y de salida, unidos por costillas y forrados con tela. Los largueros estaban unidos por unos montantes verticales para formar una estructura cajón robusta, tipo Pratt, como el planeador Chanute-Herring.

Para facilitar el aterrizaje, el plano inferior se apoyaba en un patín, formado por dos barras metálicas paralelas, que se prolongaban curvándose hacia arriba delante del avión. En la parte delantera de este patín se adosaba un plano móvil, que actuaba como estabilizador y como timón de profundidad para el control de cabeceo. El control de balanceo, necesario para inclinar el avión, como la bicicleta, cuando éste debe cambiar de dirección, se conseguía torsionando o alabeando los extremos de las alas en sentidos opuestos, a fin de aumentar el ángulo de ataque, y con ello la sustentación, de un extremo y disminuir la del otro, tal como se hace hoy con los alerones. El primer modelo y los dos primeros planeadores no disponían todavía de timón de dirección, ya que pensaron que los cambios en la dirección (guiñada) los conseguirían con el alabeo. En resumen, buscaron una solución estructural bien integrada con el control. Al igual que ocurre con algunos aviones de caza actuales, la aeronave de los hermanos Wright era inherentemente inestable, pero su estabilidad en vuelo se aseguraba mediante el control del piloto, que volaría tumbado sobre el plano inferior.

Para asegurar la consistencia estructural, hacían ensayos colgando el avión de las puntas del ala y cargándolo con pesos hasta cinco veces superiores al del piloto.

Reconocieron la necesidad de ensayos en vuelo que les proporcionaran los conocimientos necesarios de las actuaciones y les sugiriesen las modificaciones necesarias. Wilbur afirmaba que la experiencia directa del vuelo era imprescindible y ponía como ejemplo que la única manera de domar un potro era lanzándose al empuje y no esperando sentado a observar las cabriolas que hacía. Wilbur y Orville Wright fueron también los primeros pilotos de prueba.

Fueron a Kitty Hawk en busca de vientos fuertes y grandes dunas y colinas que les facilitasen el vuelo con el planeador. Empezaron haciendo volar el planeador como cometa con distintas cargas, midiendo en vuelo la sustentación y resistencia y la respuesta al sistema de control. También hicieron los primeros vuelos con el planeador sujeto como cometa con Wilbur montado y actuando sobre los mandos. Así adquiría la experiencia que, con poco peligro, le facilitase posteriormente el vuelo libre como planeador.

Descubrieron que las actuaciones no eran las que se deducían de los datos sobre la resistencia y sustentación existentes en la literatura sobre el tema, que ellos conocían bien. En particular, encontraron que el ángulo de planeo, que en radianes corresponde a la relación entre la resistencia y la sustentación, era bastante más grande que el previsto. Por ello, en el otoño de 1901 decidieron generar sus propios datos montando el segundo túnel aerodinámico.

americano, que dotaron de un sistema de balanzas para medir la relación entre la resistencia y sustentación y hacer estudios comparativos entre distintas configuraciones. Probaron más de doscientas maquetas de alas y planeadores, con lo que recogieron una información valiosísima y fiable para sus diseños posteriores. Descubrieron, por ejemplo, que la resistencia se reducía considerablemente al aumentar el alargamiento.

Permítanme que les cite las palabras con que Orville Wright explicaba el nacimiento de la preocupación de los hermanos Wright por las ciencias aeronáuticas:

“Los resultados de los vuelos de 1901, aunque mejores que los de nuestros predecesores, fueron decepcionantes. Veíamos que las actuaciones no respondían a los cálculos que hacíamos. Buscábamos ciegamente explorando las muchas causas que explicasen la discrepancia entre los resultados y nuestras predicciones, basadas en los datos científicos existentes sobre las fuerzas aerodinámicas sobre placas a distintos ángulos de ataque, que nosotros habíamos aceptado con fe absoluta. Finalmente, después de dos años de experimentación, decidimos no fiarnos de los datos existentes y tratar de obtenerlos por nuestra cuenta, teniendo en consideración que en aquel momento lo verdadero y lo falso estaban tan íntimamente mezclados que eran indistinguibles.

Para el diseño inteligente, es necesario conocer los efectos de los cambios que se incorporan a las máquinas voladoras. Las fuerzas sobre placas cuadradas son diferentes de las fuerzas sobre círculos, triángulos o elipses. Las superficies curvas se comportan de un modo diferente de las planas, y el comportamiento depende de la flecha, lo mismo ocurre con las formas parabólicas y en arco de círculo. Los perfiles gruesos difieren de los delgados en función también de la posición del máximo espesor y del ángulo de incidencia de la corriente. De manera que hay miles de combinaciones en algo tan simple como un ala.

Habíamos tomado la aeronáutica como un deporte y nos costó trabajo embarcarnos en sus aspectos científicos. Sin embargo, pronto descubrimos que este trabajo era tan fascinante que nos sumergimos en él cada vez más profundamente. Tratando de evitar los errores cometidos por otros, construimos un túnel aerodinámico donde probamos más de doscientas configuraciones a distintos ángulos de ataque.”

En 1943, Fred Kelly preguntó a Orville Wright cuál era la contribución de los Wright que consideraba más importante para conseguir volar: el control de balance mediante los cambios de ángulo de ataque de las alas o los experimentos en túnel para evaluar las fuerzas aerodinámicas.

La respuesta fue: “Bastaba que la máquina proporcionase la sustentación adecuada para que pudiese remontar el vuelo en aire en calma, aunque sin el sistema de control, éste no tendría ninguna utilidad. Sin la información que nos proporcionaron los experimentos en túnel de 1901, nunca habríamos encontrado la forma de las alas que podían sustentar la máquina con el piloto, teniendo en cuenta la potencia motriz disponible entonces. De manera que, respondiendo a su pregunta, para el primer vuelo el sistema de control fue menos importante que el conocimiento sobre la forma conveniente de las alas.”

A la pregunta “En vista de que el avión puede ser un instrumento de destrucción y muerte, ¿ha pensado en no haberlo inventado?”, respondió “No, no estoy arrepentido a pesar de que nadie lamenta más que yo la destrucción que ha causado. Siento respecto al avión lo mismo que respecto al fuego, a pesar de que lamento los daños terribles que ha causado, la raza humana, gracias al descubrimiento por uno de nuestros antepasados de cómo iniciar fuegos y mantenerlos, ha encontrado miles de usos importantes del fuego.”

Cuando en septiembre de 1902 iniciaron en Kitty Hawk los ensayos con un nuevo planeador, diseñado con la información proporcionada por los ensayos en el túnel, encontraron actuaciones que concordaban bien con sus predicciones. El ángulo de planeo se redujo a cinco grados, que corresponde a una relación L/D entre la resistencia y la sustentación próxima a 10. En los aviones comerciales actuales esta relación no sobrepasa fácilmente el valor 20.

Los resultados fueron tan satisfactorios, con un valor tan bajo de la tracción necesaria para compensar la resistencia, que a su vuelta decidieron dedicarse plenamente al empeño del vuelo propulsado. De manera que contrataron a Charles Taylor, un mecánico excepcional asentado en Dayton, que previamente había hecho trabajos para ellos, para que se encargase del funcionamiento del taller de bicicletas.

Se ocuparon entonces del problema de la propulsión, para lo que necesitaban diseñar una hélice que les proporcionase el empuje necesario para vencer la resistencia que sabían calcular. Se encontraron con que no existía un método predictivo para el diseño de las hélices, pero pronto comprendieron que podían suponer que éstas se compor-

tarian como alas que siguen una trayectoria espiral. La tracción resulta de la sustentación de cada elemento de pala, y el par a vencer con el motor corresponde a la resistencia. Se decidieron por una configuración con dos hélices bipalas, en movimiento contrarrotatorio transmitido desde el eje del cigüeñal del motor por dos cadenas de transmisión de bicicletas.

En cuanto al motor, descubrieron que no existían fabricantes dispuestos a construirles un motor con la pequeña relación (peso-potencia) que ellos necesitaban. Por ello se decidieron, con la ayuda inestimable de Charles Taylor, a diseñarlo y construirlo ellos mismos, lo que hicieron en seis meses. El motor de gasolina, de 80 kg de peso, refrigerado por aire, empezó proporcionando, a 1 000 rpm, 12 CV de potencia, cifra que aumentó posteriormente hasta 16 CV. Cuando finalmente probaron el motor con las hélices, encontraron que estas, girando a 300 rpm, tenían un rendimiento del 60%, un resultado superior al que ellos habían previsto.

Cuando, a finales de septiembre de 1903, llegaron a Kitty Hawk, se encontraron con un período de mal tiempo y vientos muy fuertes con rafagas. Aprovecharon para hacer ensayos con el planeador de 1902 y medir la eficiencia de la transmisión con las cadenas de bicicleta, que, después de algunos refinamientos, resultó ser excelente. También montaron los primeros instrumentos de navegación, entre ellos un tacómetro, un anemómetro y una cuerda que pendía del timón de profundidad, con objeto de detectar la deriva, ya que esta podía conducir a la barrera espiral si no se controlaba a tiempo.

El 13 de diciembre, a las 10:35, el *Flyer I*, después de arrancar el motor, avanzó por el carril de madera que facilitaba el despegue, lo que hizo con Orville a los mandos (porque le había correspondido la suerte) y Wilbur corriendo al lado. Tenía un viento de frente de 33 km/h. Volo horizontalmente durante 12 s unos 60 m, y aterrizó.

Después volaron alternativamente los dos hermanos otras tres veces. El último vuelo, con Wilbur de piloto, duró 59 s y recorrió una distancia de algo más de 250 m, con un viento opuesto de 32 km/h, a una velocidad de unos 50 km/h respecto al aire. Cuando estaban comentando las incidencias del vuelo, una fuerte rafaga sacudió el *Flyer I* y produjo destrozos que no intentaron reparar por falta de tiempo disponible antes de la Navidad.

Orville escribió el siguiente telegrama a su padre: "Éxito en la mañana del jueves, con cuatro vuelos contra un viento de 33 km/h, volando en horizontal con una velocidad respecto al viento de 50 km/h, el más largo de 59 s, informa a la prensa. En Navidades en casa".

Sólo cinco periodicos dieron la noticia, relegada a páginas interiores y deformada por la imaginación de los periodistas, lo que no preocupó a los hermanos Wright. No habían invertido en la hazaña más de dos mil dólares, incluyendo los costes de su trabajo y los de material y gastos de viaje. Los resultados a ojos del vulgo podían parecer modestísimos. Ellos sabían, como nosotros hoy, que ya habían dado los pasos esenciales para el vuelo humano. Ahora quedaba desarrollar el avión para convertirlo en un vehículo práctico, lo que hicieron en 1904 y 1905.

Los hermanos Wright no pudieron beneficiarse de los análisis teóricos, pero tampoco pudieron usar con fiabilidad los resultados de las medidas experimentales existentes. La causa de este vacío experimental se debe en buena medida a la falta de una descripción teórica de los flujos de interés aeronáutico, imprescindible para iluminar y guiar los métodos experimentales.

Me propongo ahora informarles someramente sobre el estado de la técnica y los conocimientos que, a finales del siglo XIX, podrían haber facilitado el vuelo con vehículos más pesados que el aire. Debo empezar advirtiéndoles que la mayor parte de los desarrollos tecnológicos anteriores al siglo XX tuvieron lugar de un modo empírico, sin el apoyo de una investigación básica o experimental de carácter científico.

Fue Galileo el primero en advertir que los cuerpos van frenando su movimiento en el aire a consecuencia de la resistencia que éste ejerce sobre ellos. Para calcular esta resistencia, Newton consideró que el aire está formado por partículas, que en su movimiento relativo al cuerpo sólo ven perturbada su trayectoria al colisionar con el cuerpo, entonces pierden la componente normal de su velocidad, reteniendo la tangencial. Así pudo obtener una fórmula para determinar las componentes de la fuerza ejercida por el aire sobre el cuerpo. Esto es, la resistencia, en la dirección del movimiento, y la sustentación, en dirección normal. Las fuerzas son proporcionales al área en planta del cuerpo, a la densidad del aire y al cuadrado de la velocidad relativa, incluyendo sendos coeficientes adimensionales dependientes de la forma del cuerpo y del ángulo de ataque incidencia. Para una placa plana, el coeficiente de sustentación varía con el cuadrado del seno del ángulo de ataque, y para la resistencia, con el cubo. A este resultado se le atribuye una influencia negativa para el desarrollo posterior del vuelo. Sin embargo, la teoría que describe el movimiento del aire alrededor de cuerpos en vuelo hipersónico recibe el apellido de newtoniana, ya que responde aproximadamente a los supuestos que hizo Newton para desarrollar su método de cálculo.

A mediados del siglo XVIII se llegó al consenso de que los fluidos, el agua y el aire entre ellos, se comportaban como medios continuos, de manera que en el movimiento relativo a los cuerpos cada una de sus partículas seguía trayec-

torias curvilíneas que se adaptaban a la forma del cuerpo. D'Alembert se ocupó de la determinación de las fuerzas que el fluido ejercía sobre el cuerpo, haciendo la hipótesis implícita de que el movimiento era irrotacional; llegó a la conclusión sorprendente, que él calificó de "paradójica", de que la resistencia era nula.

Nuestro conocimiento de cómo se mueven los fluidos cambió de un modo fundamental cuando Euler, en 1755, estableció las ecuaciones, no lineales, en derivadas parciales, que describen el movimiento, después de hacer la hipótesis de que las fuerzas ejercidas por unas partes del fluido sobre otras se reducen a una presión. Con esta hipótesis se despreciaban las fuerzas viscosas, de tipo tangencial, que en verdad son muy pequeñas en la mayor parte del campo fluido en muchísimos de los flujos que nos encontramos en la ingeniería aeronáutica.

Las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos en régimen continuo, incluyendo los efectos de las fuerzas viscosas, son las ecuaciones de Navier-Stokes. Fueron escritas en primer lugar por Navier, en 1823, que las dedujo mediante consideraciones difíciles de sostener sobre la estructura de los fluidos. George Stokes, que ocupó en Cambridge durante muchos años la cátedra de Newton, estableció de forma definitiva, en 1845, las leyes del movimiento de los fluidos apoyándose en la descripción tensorial de Cauchy de los esfuerzos en los medios continuos. Cuando murió, hace cien años, nos dejó como herencia no sólo sus ecuaciones sino muchas otras aportaciones, entre ellas el descubrimiento de la fluorescencia. Ésta proporciona hoy, con ayuda de los láseres, uno de los procedimientos más eficaces de visualización de los flujos de los fluidos y medición de concentraciones de especies reactivas. A su muerte, Lord Kelvin escribió que las contribuciones de Stokes a la ciencia y al pensamiento científico sólo están recogidas parcialmente en sus obras. Dio generosamente y libremente parte de sus tesoros a todos los que fueron afortunados al tener la oportunidad de recibirlos. Durante los treinta años en que fue secretario de la Royal Society, muchos de los autores de las comunicaciones le agradecerían la ayuda e inspiración que recibieron con sus observaciones.

El sistema de ecuaciones de Navier-Stokes parecía en el siglo XIX demasiado complejo para intentar deducir de ellas, con carácter general, conclusiones para la solución de los problemas de la ingeniería, salvo en aquellos casos como los de los problemas de tipo acústico, en que las fuerzas viscosas son despreciables. Éste parecía ser también el caso de los movimientos de cuerpos no microscópicos en el agua o en el aire, por lo que se intentó describir tales movimientos sin considerar las fuerzas viscosas.

El mismo Stokes describió en 1843 el movimiento irrotacional no viscoso alrededor de una esfera y encontró, como D'Alembert, pero ya de un modo más riguroso, que la resistencia es nula. Hoy sabemos que no hay resistencia ni tampoco sustentación en los movimientos estacionarios irrotacionales alrededor de cuerpos de dimensiones finitas. Sólo cuando, en 1868, Helmholtz introdujo las capas de torbellinos en el estudio de los movimientos de los fluidos no viscosos, se abrió una puerta para reconciliar la realidad con la teoría. Kirchhoff y Rayleigh usaron estas capas de torbellinos en la descripción del movimiento de fluidos alrededor de una placa, y mostraron que los torbellinos son responsables de la estela que queda tras la placa. Con ello pudieron calcular los valores de la resistencia y de la sustentación, pero los resultados no concordaban con las medidas experimentales, aunque tampoco éstas resultaron ser muy fiables. La extensión del análisis al movimiento alrededor de cuerpos con superficies no angulosas se debe a Levi-Civita en 1901.

Podemos atribuir la iniciación de las observaciones experimentales a Benjamin Robbins, que, ocupado en la determinación de las fuerzas del aire sobre proyectiles, introdujo el péndulo balístico, en 1742, y el brazo giratorio, en 1747. Encontró que, como había predicho Newton, la resistencia crece con el cuadrado de la velocidad y encontró también un crecimiento anormal de la resistencia cuando la velocidad se acerca a la del sonido. La observación del flujo supersónico alrededor de cuerpos se inicia en 1887 cuando Ernst Mach fotografió el flujo alrededor de una bala usando estroboscopia para la visualización.

Los experimentos de Reynolds sobre los flujos turbulentos, iniciados en 1883, y complementados con las ecuaciones, que ahora llamamos *de Reynolds*, a las que responden los valores medios de flujos, fueron básicos para iniciar el acercamiento de la mecánica de fluidos a la solución de los problemas fluidodinámicos de la ingeniería. A este respecto fue también importantísima la aportación de Reynolds a la teoría de la lubricación hidrodinámica.

En el campo específico de las ciencias aeronáuticas, la situación empezó a cambiar un año antes del vuelo de los Wright, cuando el matemático Wilhelm Kutta, el del método de Runge-Kutta, que se había interesado por los vuelos con planeadores, se planteó cómo calcular el movimiento alrededor de un perfil en forma de arco de círculo, como eran los perfiles usados por Lilienthal. Descubrió que la solución correspondiente al movimiento irrotacional no era única salvo si se especificaba el valor de la circulación de la velocidad alrededor del perfil, y que la sustentación era *proporcional a esta circulación, con el factor de proporcionalidad igual al producto de la densidad del aire por la velocidad de la corriente relativa al perfil*. Este resultado fue obtenido poco después, independientemente, por el profe-

sor Joukowski en la Universidad de Moscú. También él estaba interesado por el vuelo, de tal manera que llegó a comprar un planeador a Lilienthal

Kutta introdujo la hipótesis, que fue pronto justificada por Prandtl, de que el valor de la circulación podía determinarse con la condición de que la velocidad del aire debe ser finita en el borde de salida del perfil, y esto determina a su vez el valor de la sustentación del perfil. Encontró, sin embargo, que el valor de la resistencia resultaba nulo, como herencia de la paradoja de D'Alembert. (La hipótesis de Kutta no elimina la posibilidad de velocidades infinitas en bordes de ataque afilados, la depresión que se crea allí proporciona la tracción del borde de ataque que contribuye a anular la resistencia.) Este resultado sorprendente da un valor infinito a la relación sustentación/resistencia, objetivo ideal de los ingenieros aeronáuticos.

La mecánica de fluidos cambió radicalmente cuando en 1904, hace ahora cien años, Ludwig Prandtl, que tenía veintinueve años y acababa de ser nombrado director del Instituto de Mecánica Aplicada de la Universidad de Göttingen, presentó en el Tercer Congreso Internacional de Matemáticas en Heidelberg uno de los trabajos más trascendentales de la literatura científica. Esta recogido en las actas del Congreso, donde de modo muy claro, aunque sucinto, porque sólo tuvo doce minutos para su exposición, se sientan las bases de la mecánica de fluidos moderna y se explican muchos de los fenómenos que antes parecían misteriosos.

En muchos flujos en torno a cuerpos, las fuerzas viscosas pueden despreciarse en la mayor parte del dominio fluido, pero, como observó Prandtl, no cerca de la pared ni en una estela aguas abajo. Fuera de estas regiones, el fluido responde como no viscoso o, como nosotros decimos, como *ideal*, el movimiento puede describirse mediante las ecuaciones de Euler. Al movimiento de un fluido ideal no se le puede imponer la condición de no deslizamiento en la pared, por lo que el fluido de la corriente exterior se desliza respecto a la pared con una velocidad no nula. Ésta cae rápidamente a cero a través de la delgada capa límite, donde entran en juego los efectos de la viscosidad. La capa límite puede desprenderse ante gradientes de presión adversos, prolongándose en las capas de torbellinos de Helmholtz, que cambian radicalmente la estructura del flujo.

El desprendimiento de la capa límite sólo puede evitarse, o más bien retrasarse, utilizando cuerpos fuselados esbeltos y alas delgadas, y operando en ángulos de ataque pequeños. Para asegurar que el punto de desprendimiento esté cerca del borde de salida, los bordes de salida deben ser afilados, como los de los aviones, tal como supongo que habrán observado ustedes.

La resistencia que en esas condiciones tienen los perfiles, o las alas de envergadura infinita, es muy pequeña. Sólo se debe a las fuerzas viscosas que actúan en la capa límite, como nos enseñó a calcular Prandtl. La sustentación es proporcional al ángulo de ataque hasta que, a veces bruscamente, el punto de desprendimiento se desplaza a las proximidades del borde de ataque y el ala entra en pérdida, de modo que deja de producir sustentación.

En las alas de envergadura finita, cuando la capa límite se desprende cerca del borde de salida, se genera en cada ala una capa de torbellinos, según descubrió el inglés Lanchester y calculó Prandtl, que conduce a un valor ya no nulo de la resistencia, que llamamos *inducida*. Las capas de torbellinos se enrollan aguas abajo para formar la pareja de torbellinos contrarrotatorios que sirven de estelas de condensación, y señalan el paso de los aviones si las condiciones de la atmósfera son apropiadas.

Prandtl, con la colaboración de Theodore von Karman y de una asociación para el progreso del vuelo, montó en Göttingen un túnel aerodinámico de circuito cerrado que sirvió de guía para la construcción de muchos otros túneles aerodinámicos.

También Theodore von Karman hizo contribuciones muy importantes, tanto a la aerodinámica como a los aspectos estructurales de los aviones. Cuando fue nombrado director del Guggenheim Aeronautical Laboratory del Instituto Tecnológico de California, después de su creación en 1928, convirtió este centro de investigación y enseñanza en otro centro de excelencia como el de Göttingen. Von Karman contribuyó de un modo esencial al éxito del DC3, el avión emblemático de la aviación comercial, que inició sus vuelos en 1935 y todavía tuvo mil modelos en vuelo en el 2001.

En España las aportaciones a la aeronáutica nacen con la contribución de Leonardo Torres Quevedo al desarrollo del dirigible de estructura semirrígida Astra-Torres. Quevedo. Los dos primeros títulos de pilotos de avión fueron obtenidos por Benito Loygorri y el infante Alfonso de Orleans en Francia en 1910. En 1911 se concedieron los primeros títulos en España a cinco pilotos procedentes del cuerpo de ingenieros militares. Tres de ellos tuvieron un papel importante en la aeronáutica española. Alfredo Kindelan dirigió la Aviación Militar en el lado nacional y Emilio Herrera, que en 1921 construyó el túnel aerodinámico de Cuatro Vientos y fue el creador y primer director de la Escuela Superior Aerotécnica, dirigió la aviación militar en el lado republicano. Ortiz Echagüe fue presidente de Construcciones Aeronáuticas (CASA).

Sin duda, la aportación más singular española es la del autogiro de Juan de la Cierva. Introdujo la articulación de batimiento de las alas giratorias y otros avances que fueron incorporados finalmente a los helicópteros, con lo que se eliminaron las inestabilidades que habían plagado su desarrollo anterior. El primer vuelo tuvo lugar en 1923, después de haber llevado a cabo ensayos en el túnel de Cuatro Vientos.

Mi propia actividad docente e investigadora ha estado ligada, de un modo general, a la mecánica de fluidos, disciplina que sirve de soporte para el estudio de la aerodinámica externa de aviones y misiles y, también, para la aerodinámica interna, correspondiente a los flujos, asociados a la propulsión, en compresores, turbinas y toberas. De un modo más específico, mi labor investigadora y una parte de mi actividad docente han estado dedicadas al análisis de los procesos de combustión, en los que tiene un papel fundamental la dinámica de fluidos con reacciones químicas.

My iniciación en esta actividad investigadora arranca de 1958, como becario del grupo español de investigación en combustión, formado por ingenieros aeronáuticos, también profesores en la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos, dedicados en el INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeronáutica) a la investigación conducente al desarrollo de nuestros conocimientos sobre los procesos de combustión. El grupo, dirigido por Gregorio Millán, nació en los años cincuenta con el apoyo valiosísimo de Theodore von Karman, quien inició su preocupación por la combustión al ocuparse, durante la Segunda Guerra Mundial, de los problemas del diseño de misiles y cohetes de sondeo. Durante este período, entre otras actividades, creó el Jet Propulsion Laboratory, del Instituto Tecnológico de California.

Von Karman observó que faltaba el marco conceptual, necesariamente interdisciplinar, para el análisis de los procesos de combustión. Se propuso crear este marco ampliando las ecuaciones generales de la dinámica de fluidos para poder analizar los procesos de mezcla y transporte de especies reactivas y del calor, y productos generados en las reacciones químicas entre estas especies. En el análisis se debían incluir los fenómenos de cambios de fase y atomización de los combustibles líquidos inyectados en las cámaras de combustión.

Para la construcción de este marco general, Von Karman recabó la ayuda del profesor Saul Penner, del CALTECH, y del profesor Gregorio Millán, de la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos, a quien había conocido Von Karman cuando vino a España en 1948 invitado por Esteban Terradas para dar un ciclo de conferencias sobre aerodinámica supersónica y sobre el aprovechamiento de la energía eólica.

Cuando por primera vez, en 1951, Von Karman presentó la aerotermodinámica como el marco conceptual para el análisis de los procesos de combustión, en un curso específico en la Sorbona, fue Gregorio Millán su ayudante y el encargado posteriormente de escribir, con ayuda de los colaboradores del grupo de combustión formado para ello, una edición actualizada de las notas del curso. Cuando se publicaron en 1958, en una monografía muy extensa con el título *Aerothermochemistry*, ésta reunía de una forma coherente las leyes que permitieron analizar los procesos de combustión. Sólo fue superada con la publicación en 1965 de la primera edición del libro de Forman Williams, discípulo de Saul Penner, que utilizó la metodología de la *Aerothermochemistry* e incorporaba los desarrollos recientes, al igual que hizo la monumental segunda edición del *Combustion Theory* de Williams de 1985.

Ha sido para mí un gran placer empezar a ver recientemente artículos relevantes sobre combustión de un grupo de Terrassa, publicados en las revistas más prestigiosas. Reciban por ello mi felicitación más calurosa y sepan que pueden contar con mi colaboración en todo lo que me sea posible.

Diré finalmente algunas palabras respecto al sistema propulsivo de los aviones y de algunos de sus problemas actuales. La velocidad de los aviones actuales no pudo alcanzarse hasta que durante la década de los cuarenta no se inició el desarrollo de los motores de reacción, a los que también Von Karman dedicó su atención.

El uso de combustible para producir empuje se mide con el consumo específico, esto es, los kg/h quemados por kilo de empuje, ahora en torno a 0,4, depende del rendimiento global del sistema propulsivo. Éste es el producto del rendimiento térmico por el rendimiento propulsivo. El primero representa la relación entre la energía mecánica transmitida al aire y la energía química liberada, esta relación está ligada al rendimiento de Carnot. Paso del 40%, a principios de la década de los cincuenta, al 60% actual (con un posible tope en el 70%). Todavía hoy el 40% de energía suministrada al combustible no se utiliza para generar energía cinética o mecánica, sino térmica.

El rendimiento propulsivo corresponde a la efectividad con que la energía cinética se transforma en trabajo ligado al empuje, es igual al producto de ésta por la velocidad del avión. Naturalmente, este rendimiento es nulo con el avión parado, pero crece a los valores actuales del 70% en los motores de doble flujo. Este valor ha de compararse con los valores en torno al 50% de los reactores de la década de los cincuenta. Teóricamente, este rendimiento podría acercarse al 100%, con lo que el rendimiento global podría subir del 36% actual al 70%.

El rendimiento térmico crece al aumentar la presión en la cámara de combustión, pero desgraciadamente también crecen los óxidos de nitrógeno generados de acuerdo con el mecanismo de Zeldovich. Para reducir sus emisiones, hay que reducir a muy pocos milisegundos el tiempo de residencia de los gases de combustión en la cámara, asegurándose de que se ha completado la oxidación del monóxido de carbono y también la vaporización de las gotas del combustible líquido.

Afortunadamente, el sistema de doble flujo de los motores de reacción, con un compresor con alta relación de compresión para alimentar la cámara de combustión y un ventilador, una especie de hélice carenada, para la propulsión, ha dado lugar a los altos rendimientos propulsivos actuales. Esto supone el beneficio añadido de reducir no solo el consumo de combustible, y por tanto las emisiones de CO_2 , sino también el ruido aerodinámico, que James Lighthill nos enseñó a calcular y con ello a mitigar.

La reducción de la contaminación ambiental debida al ruido y a las emisiones es sólo uno de los muchos retos de la ingeniería aeronáutica. Ésta tiene múltiples facetas que están en desarrollo vertiginoso, dado el crecimiento imparable del tráfico aéreo. Se ocupa no sólo del avión, como decimos nosotros, de la *célula*, sino también de su propulsión y de los sistemas auxiliares y acondicionamiento de cabina, de su aviónica y de los sistemas de control de tráfico aéreo, y, finalmente, de la infraestructura aeroportuaria.

Estoy seguro de que los profesores y alumnos de la Universidad Politécnica pronto se enfrentarán eficazmente a estos retos.

Muchas gracias.